

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

曲げ荷重を受けるCFRP板材への鋼球衝突損傷

著者	川尻 剛大
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	57
ページ	1-8
発行年	2016-03-24
URL	http://hdl.handle.net/10114/12278

曲げ荷重を受ける CFRP 板材 への鋼球衝突損傷

STEEL BALL IMPACTING DAMAGE TO CFRP LAMINATES SUBJECTED TO BENDING LOAD

川尻剛大

Takehiro KAWJIRI

指導教員 崎野清憲

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) is one of composite materials. CFRP is superior in the specific strength and rigidity, which is useful in the fields required to reduce the weight of products. However, CFRP have the problem causing delamination between layers by the impact. Invisible delaminates may cause a great accident. In this study, a relationship between impact energy and delamination area of CFRP laminates was investigated. The impact tests that detect the effect of bending load and high temperatures on the layer delamination area of CFRP laminate are made using an air-gun system and incubator. Scanning Acoustic Microscopy (SAM) is utilized for detecting the delamination area of CFRP laminates. The residual strength of the specimen being damaged is also examined by using three point bending device. In convex transformation, the strength decrease was suppressed by delamination area is reduce at 7/8 layers. In concave transformation, the strength decrease was increased by fiber break in 8 layer.

Key Words : CFRP laminates, Delamination area, Bending load, High temperature, SAM

1. 緒論

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、比強度と比剛性に優れた材料として軽量化を求められている様々な分野で活用が試みられている。CFRP は積層材料であり、繊維方向の荷重に対して優れた強度を有するが、繊維方向に対し垂直に衝撃を受けた際内部に剥離が生じやすい欠点をもつ。外見からは確認できない剥離による内部損傷は材料の強度に影響をおよぼし、重大な事故を引き起こす要因となる。構造物に用いられる場合単純な平面での荷重だけでなく、様々な方向からの力が加わり曲げ荷重が加わることが想定される。また、実際には温度変化による影響も

考えられるため高温など厳しい温度環境での使用が材料に与える影響も考慮する必要がある。そこで、本研究では曲げ荷重が CFRP 板材の鋼球衝突損傷におよぼす影響、温度による影響を明らかにするために、曲げ荷重をかけ、高温環境下で衝突実験を行い、比較、検討を行った。衝突によって CFRP に生じる層間剥離面積を、超音波探査装置（日立、HYE-FOCUS、周波数 50MHz）を用いて測定し、各条件下における CFRP の損傷への影響を検討した。

2. 実験

(1) 試験片

試験片は東レ製プリプレグ (P-3052S-12) を繊維配向が $[90^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 45^\circ]$ s に積層された 8 層の CFRP 板材を使用し, 1, 8 層目に繊維が垂直の 90° の長手方向になるように試験を行った. 使用したプリプレグは, 繊維に高性能炭素繊維トレカ糸を, マトリックスに硬化剤を含む熱硬化性樹脂 (エポキシ: #2500-130℃硬化型) を用いて構成されており炭素繊維含有率は 67vol% である. 実験に使用した試験片は寸法が板厚 1.0mm 縦 100mm, 横 50, 40mm の 2 種類である.

(2) 試験条件

本実験で用いた飛翔体は直径 6mm の鋼球である. 鋼球をホールドするサボットは直径 20mm 長さ 60mm の円柱形発砲ポリスチレンを用いた.

試験条件として CFRP 板材への飛翔体の衝突速度範囲は 100m/s~180m/s, 曲げ荷重 50kN, たわみ量は中心部分の最大変位量が 10mm となった. また, 変形方向が衝突方向に向いているものを凸面その逆を凹面と定義した. 試験温度は, 常温 (293K), 333K, 373K とした. 試験温度は, 熱電対を使用し試験片表面温度を計測した.

(3) 実験方法

Fig. 1 に衝撃試験装置の概要を示す. 曲げ荷重衝突試験時には, Fig. 2 の曲げ試験専用の治具に CFRP 試験片を固定する. サボットに鋼球を設置したものを銃身に挿入し, エアコンプレッサーを用いて空気をエアタンク内に圧縮させ, 解放することでサボットを発射し試験片に衝突させる. この時銃身の先端に取り付けられているセンサーで鋼球の通過時間を測定し, 速度を算出さらに鋼球の質量と速度から衝突エネルギーを算出した.

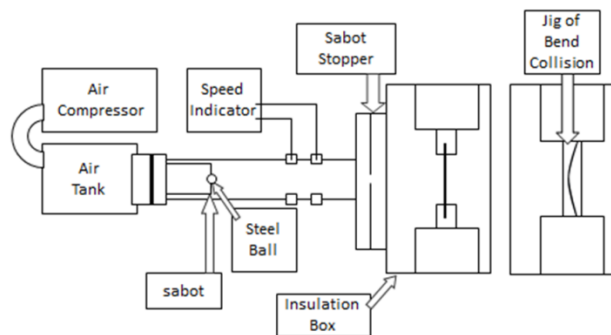


Fig.1 Experimental device for impacting damage of CFRP

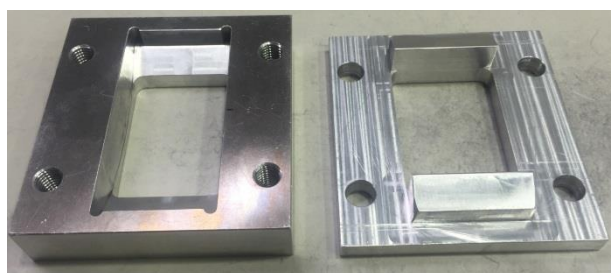


Fig.2 Jig for bending load

(4) 残留曲げ強度試験

衝突試験を行った CFRP 板材の残留強度を評価するために三点曲げ試験を行った.

曲げ試験片は衝突試験を行った試験片より衝突点を中心に幅 15mm, 長さ 100mm に切り出し, 標点間距離を 80mm, 圧子の試験速度 2.67mm/min として試験を行い, (1) 式を用いて残留曲げ強度を求めた.

$$\sigma = \frac{PL}{bh^2} \left[1 + 4 \left(\frac{\delta}{L} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここで, σ : 残留曲げ強度 [MPa], P : 最大曲げ荷重 [N], δ : たわみ量 [mm], b : 試験片の幅 [mm], h : 試験片の厚さ [mm], L : 支点間距離 [mm] である.

3. 実験結果及び考察

(1) 曲げ荷重による衝突エネルギーと剥離面積の関係

Fig.3 は, 常温状態での平面, 凸面, 凹面における CFRP 板材の剥離面積と衝突エネルギーの関係を示したグラフである. 平面に比べ衝突エネルギーが大きくなると凸面では総剥離面積が増加する傾向が見え, 凹面では総剥離面積が若干減少している傾向

が見えるが大きな剥離面積の変化は見られない。

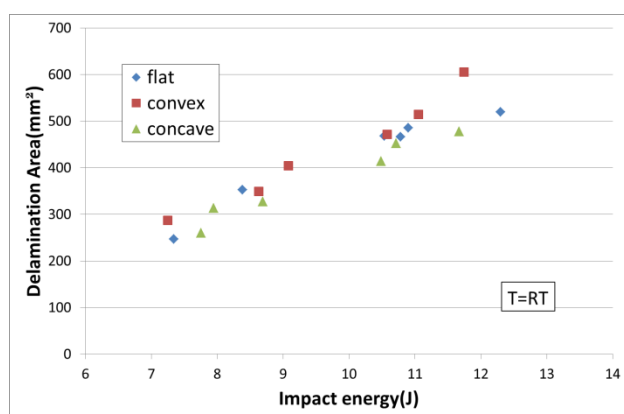


Fig.3 Relation between impact energy and delamination area in three type of setting conditions

一方で Fig.4 の各層剥離面積のグラフを見ると平面に比べて凸面では 6/7 層の剥離が増加し、7/8 層の剥離は減少する傾向が見える。凹面では 7/8 層の剥離が増加し、その他の層の剥離は減少する傾向が見える。

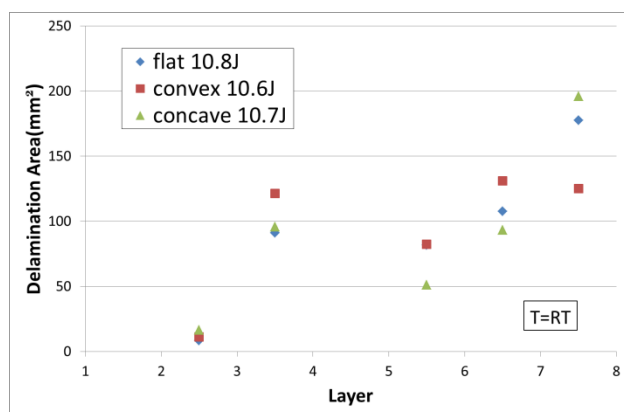


Fig.4 Relation between each layer and delamination area caused in three type of setting conditions

この原因として Fig.5 の剥離画像を見ると真ん中の凸面剥離画像では左の平面剥離画像に比べて青色の 7/8 層の縦方向の剥離進展が抑えられ、代わりに緑色の 6/7 層の剥離が横方向に進展し大きく膨らんでいる様子が確認できる。このことから本試験条件では 8 層目の繊維が 90° 方向の長手方向になっているため、最も繊維の強度が高い方向に曲げ荷重が加えられており、さらに変形による力が最も大きくかかる 8 層に繊維があることで、曲げ変形への抵抗が

大きく縦方向の剥離の進展の抑止につながる。その結果、衝突エネルギーが 6/7 層の横方向への剥離面積増加に使われ、このような各層剥離面積の変化が生じたと考えられる。また、右の凹面剥離画像では平面に比べ青色の 7/8 層の剥離が縦に大きく進展していることが確認できる。これは凹面では衝突による変形と同じ方向に変形の力が加わっているため、最も変形による力の影響を受ける 8 層目の 90° 方向の繊維に対する負荷が増加するためである。また、高エネルギーになる 8 層目の最裏面において繊維の破断が生じるため 7/8 層の剥離面積は大きくなったと考えられる。一方で繊維の破断に衝突エネルギーを使用し衝突エネルギーが減少したことで、その他の層で剥離面積の減少が生じたと考えられる。

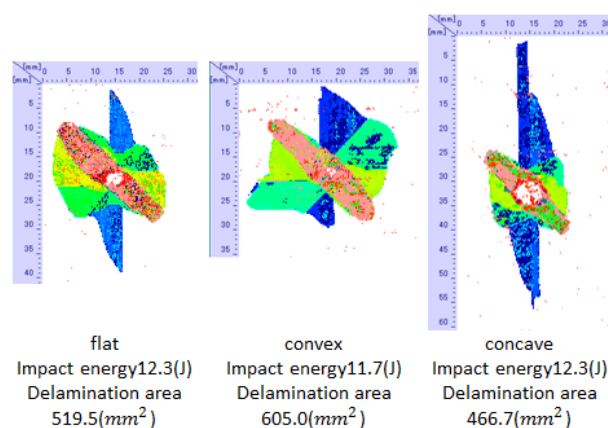


Fig.5 Delamination image of CFRP in three type of setting conditions

(2) 積層方向の違いによる剥離面積の変化

Fig.6 は 1, 8 層目の繊維が 0° 方向の短手方向となる試験片を用いた平面, 凸面, 凹面における CFRP 板材の剥離面積と衝突エネルギーの関係を表すグラフである。総剥離面積を比較すると平面に比べ、凸面では衝突エネルギーの増加と共に総剥離面積が大きく増加しており、凹面ではわずかに総剥離面積が減少している傾向が見える。

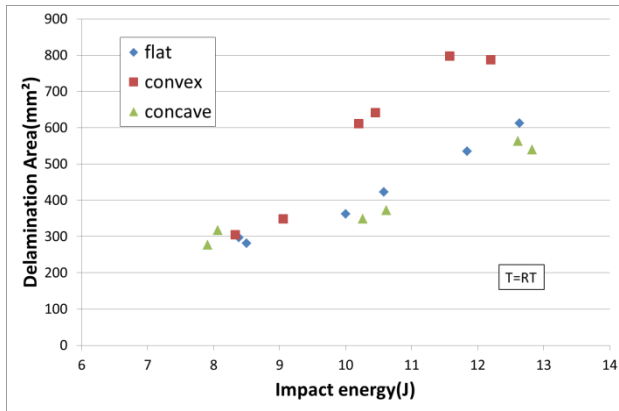


Fig.6 Relation between impact energy and delamination area in three type of setting conditions

この原因として Fig.7 の各層剥離を見ると 3, 6 層に 90° の繊維が来るため、凸面では縦方向の剥離進展を抑制する力が軽減される。一方で、横方向の剥離は進展しやすくなっているため、最も剥離が大きくなる 7/8 層をはじめこの条件では横方向への剥離面積が平面に比べ大きくなったと考えられる。凹面では 5/6 層の剥離が平面に比べ大きく下がっているように 6 層目の 90° 繊維において破断が生じた。そのため、破断に衝突エネルギーが使われ全体の剥離面積が低下したと考えられる。

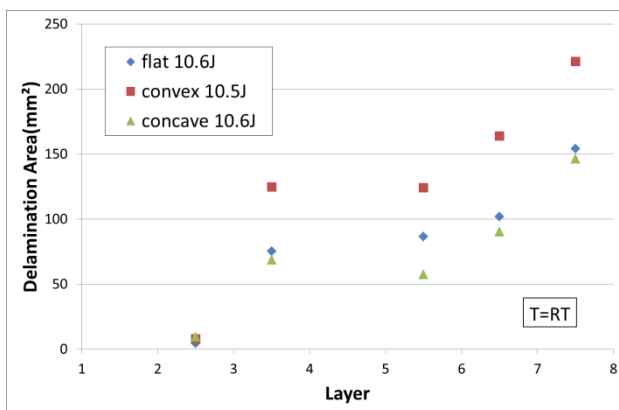


Fig.7 Relation between each layer and delamination area

(3)温度による剥離面積への影響

Fig.8 は 333K での平面、凸面、凹面における CFRP 板材の剥離面積と衝突エネルギーの関係を表すグラフである。333K では常温と比較して凹面での剥離面積の大きさに変化は見られないが凹面では

剥離面積の減少が確認できた。この原因として 333K の凹面では 1 層目と 8 層目両方で繊維破断が生じることが確認できた、そのため衝突エネルギーが減少し剥離面積の減少につながったと考えられる。

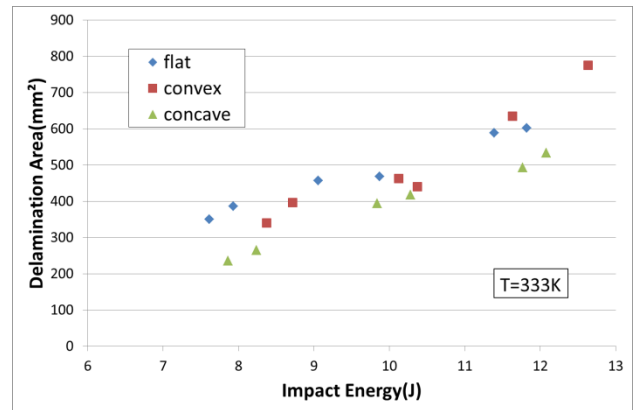


Fig.8 Relation between each layer and delamination area in three type of setting conditions at 333K

Fig.9 は 373K での平面、凸面、凹面における CFRP 板材の剥離面積と衝突エネルギーの関係を表すグラフである。このグラフからは平面と凹面の剥離面積に違いは見られないが、凸面の剥離面積が増加している傾向がみられる。これは高温になることで母材のエポキシ樹脂が炭化しもろくなり、それにより耐衝撃性が低下することで剥離が生じやすくなり横方向の剥離が増加しやすくなったためと考えられる。凹面では剥離面積の変化は見られなかったが、高温になることで母材であるエポキシ樹脂は炭化しもろくなる、結果 373K では 1 層目で大きな繊維破断が確認された。

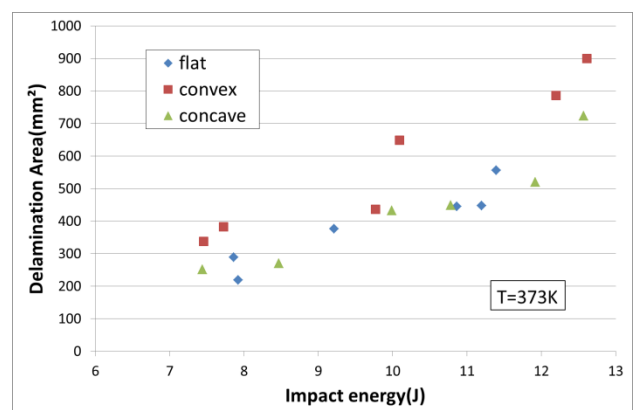


Fig.9 Relation between each layer and delamination area in three type of setting conditions at 373K

(4)残留曲げ強度

Fig.10は常温での平面,凸面,凹面におけるCFRP板材の剥離面積と残留曲げ強度の関係である,平面に比べ凸面は残留曲げ強度の低下が少なく,凹面は残留曲げ強度の低下が大きい.これは総剥離面積の変化は少ない一方で今回の曲げ強度に最も影響を与える90°の繊維である8層に関与している7/8層の剥離が凸面では減少したため強度の低下が少なかったと考えられる.一方,凹面では変形方向に力が加わったこともあり8層目の繊維に破断が生じた事が大きな強度低下を招いたと考えられる.

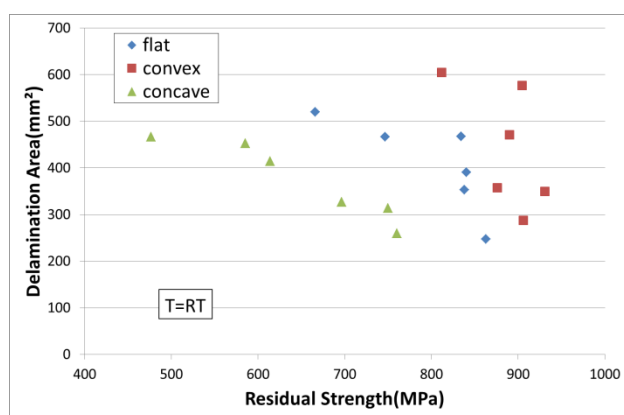


Fig.10 Relation between residual strength and delamination area in three type of setting conditions

次に, Fig.11は常温, 333K, 373Kでの平面,凸面,凹面におけるCFRP板材の剥離面積と残留曲げ強度の関係を示している.高温状態において,常温と333Kでの強度に変化は見られないが,平面は373Kでは剥離面積の増加とともに常温,333Kに比べ強度が低下していく傾向がみられる.凹面は373Kでは剥離面積が小さい状態でも常温,333Kに比べ強度が大きく低下していることが確認できる.これは,373Kでは1層目で繊維の破断が生じているため曲げを加えた時の内側に生じる圧縮に対する強度が大きく下がっているためそれが全体の強度低下につながったと考えられる.凸面は高温状態でも常温状態と同じ剥離面積で比べて強度低下は見られないが,373Kになると同じ衝突エネルギーでも剥離面積が増加するため,結果として剥離面積の上昇による強度の低下につながっている.

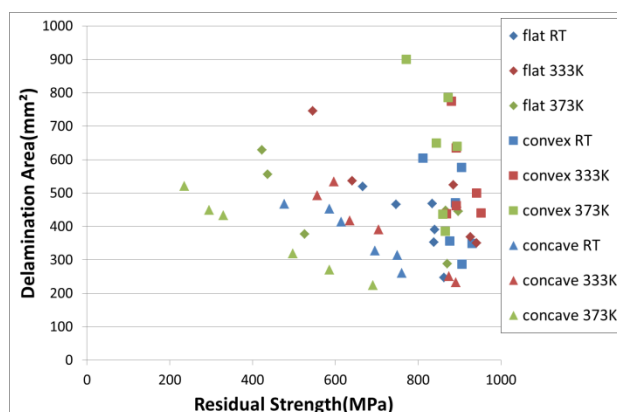


Fig.11 Relation between residual strength and delamination area obtained at temperatures of RT, 333K, 373K respectively in three type of setting conditions

4. 結論

常温における曲げ荷重では総剥離面積の大きな変化は見られなかったが,各層剥離面積では変化がそれぞれ確認され,結果として凸面では変形の加わった繊維方向の剥離が減少する傾向が確認され,残留曲げ強度は下がりにくくなった.一方で,凹面では曲げ荷重の加わった方向の8層目の繊維で破断が生じやすくなり残留曲げ強度の低下が生じた.

高温環境においては333Kでは剥離面積,残留強度共に温度による影響は見られないが,373Kでは母材であるエポキシ樹脂の硬化温度である403Kに近いこともあり凸面では剥離面積の増加による強度の低下,凹面では1層目の繊維で破断が生じ残留強度の大きな低下が確認された.

5. 謝辞

本研究に際して様々なご指導を頂きました崎野清憲教授に深く感謝致します.また多くのご指摘と共に実験を行なってくださった,崎野研究室の後輩,機械工学専攻の同期の皆様に深く感謝致します.

参考文献

- [1] 田中,黒川,他2名,日本航空宇宙学会誌
Vol.37,No.425(1989)
- [2] 清水,足立,他2名,日本機械学会論文集
Vol.63,No.607(1997)